



TITLE:

永久磁石型同期モータの高性能化 に向けた損失解析とトルク脈動低 減に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

中野, 正嗣

CITATION:

中野, 正嗣. 永久磁石型同期モータの高性能化に向けた損失解析とトルク脈動低減に関する研究. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20704>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-09-24に公開

| | | | |
|---|---------------------------------------|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (工 学) | 氏名 | 中野 正嗣 |
| 論文題目 | 永久磁石型同期モータの高性能化に向けた損失解析とトルク脈動低減に関する研究 | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>本論文は永久磁石型同期モータおよび発電機の高性能化を実現するため、損失とトルク脈動に着目し、その解析手法および低減手法について提案を行ったものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。モータや発電機の高効率化および高性能化は持続的社会的実現に向けて極めて重要な課題である。特に、永久磁石型同期モータや発電機では、その適用範囲が広がるにつれ、小型・高効率化（低損失化）、トルク脈動低減など高性能化への要求が高まっている。回転子に導電率の大きいNd-Fe-B系の永久磁石を用いた場合、回転子の渦電流損が無視できない場合があり、渦電流損低減の設計指針と渦電流損の高速かつ高精度な計算手法が重要となる。また、製造工程に起因するモータ性能の変化をシミュレーションによって定量化する技術、あるいは性能の変化を抑制する技術も重要となっている。そこで、本論文では回転子の渦電流損、鉄心内部に発生する応力で増加する鉄損、製造ばらつきに起因するトルク脈動について着目し、その解析手法および低減手法について提案を行った。</p> <p>第2章では、集中巻の永久磁石型同期モータを対象とし、有限要素解析 (FEA : Finite Element Analysis) と理論的考察により回転子の渦電流損と電機子起磁力との関係について検討した。極数とスロット数の組合せの異なる計 5 種類の表面磁石型モータについて FEA による磁界解析で回転子の渦電流を求め、極数とスロット数による渦電流損の違いを確認した。次に、渦電流の分布を時間と空間で周波数分析し、回転子に同期しない電機子起磁力の成分と渦電流との関連性を明らかにした。さらに、風力発電用のダイレクトドライブ型の永久磁石型同期発電機の渦電流損の例について述べ、ほとんど同じ極数でも極数とスロット数の組み合わせによって回転子の渦電流損が大きく変化することを明らかにし、モータおよび発電機の設計における重要な知見を得た。</p> <p>第3章では、モータをインバータで駆動することを想定し、キャリア高調波を考慮した回転子の渦電流損の計算方法として、インピーダンスを用いた計算方法について検討した。2 相通電と 3 相通電におけるインピーダンスを導出し、そのインピーダンスを用いて渦電流損を計算し、PWM (Pulse Width Modulation) の電圧波形を与えて有限要素解析で直接解く方法と比較した。さらに、負荷電流により磁気飽和の状態が変化するモータにおいて渦電流損の計算精度を向上するために、負荷電流を直流で与えた状態で高周波を重畳しインピーダンスを計算する方法を提案し、計算精度向上の効果を確認した。また、提案手法は同じ負荷電流条件下で PWM の電圧波形が異なる計算を行う場合に計算時間を大幅に削減できることを示した。</p> <p>第4章では、モータの製造工程に起因して損失が増加する例として、モータのフレーム等による固定子鉄心に生じる応力が鉄損に与える影響に着目した。固定子内部の応力分布を詳細に考慮して鉄損解析が可能な応力と磁界の連携解析システムを構築するとともに、鉄損解析時に応力を取扱う方法として「ミーゼス相当応力を用いる手法」、「主応力のスカラー値を用いる手法」、「主応力と磁束密度の向きを考慮する手法」の 3</p> | | | |

| | | | |
|--|--------|----|-------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 中野 正嗣 |
| <p>つの手法を提案し、シミュレーション結果と実測結果との対比からこれらの手法の比較検討を行った。上記手法を用いてモータの鉄損解析を行い、実測結果との比較を行った結果、「主応力と磁束密度の向きを考慮する手法」が他の手法よりも高精度となることを示した。</p> <p>第5章では、製造ばらつきに起因するトルク脈動を低減する手法として、新たな固定子鉄心構造を提案し、FEAと実機評価によってその効果を実証した。まず、回転子の製造ばらつきに起因するコギングトルクに関する理論検討を行い、固定子鉄心の軸方向の一部にダミースロットを配置する構造を提案した。この構造に関する磁気回路モデルからパーミアンス関数を導出し、回転子の製造ばらつきに起因するコギングトルクを評価するパラメータを提案した。FEAによって提案構造のコギングトルク低減効果を明らかにするとともに、提案した評価パラメータの妥当性についても検証を行った。また、コギングトルクを実測することより、提案した固定子鉄心構造の有効性を実証するとともに、提案構造が平均トルクや出力、効率にほとんど影響を与えないことも示した。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果についてまとめるとともに、今後の研究の課題と展望を述べている。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本論文は永久磁石型同期モータおよび発電機の高性能化を実現するため、損失とトルク脈動に着目し、その解析手法および低減手法について提案を行ったものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 極数とスロット数の組み合わせが異なる 5 種類の表面磁石型モータについて、有限要素解析を用いた磁界解析により回転子の渦電流を求め、極数とスロット数による渦電流損の違いについて確認した。次に、回転子に発生した渦電流の分布を時間と空間で周波数分析し、回転子に同期しない電機子起磁力の成分と渦電流との関連性を明らかにし、永久磁石型同期モータおよび発電機の設計における重要な知見を得た。

2. インバータ駆動時のキャリア高調波を考慮した回転子の渦電流損を計算するため、2 相通電と 3 相通電におけるインピーダンスを導出し、そのインピーダンスを用いて渦電流損を計算し、PWM の電圧波形を与えて有限要素解析で直接解く方法と比較した。さらに、負荷電流を直流として与えた状態で高周波を重畳する方法を提案し、負荷電流により鉄心の磁気飽和の状態が変化するモータにおいて計算精度向上の効果を確認した。また、提案手法は同じ負荷電流条件下で電圧波形が異なる計算を行う場合に計算時間を大幅に削減できることを示した。

3. モータのフレーム等により固定子鉄心に生じる応力が鉄損に与える影響に着目し、固定子内部の応力分布を詳細に考慮して鉄損解析が可能な応力と磁界の連携解析システムを構築した。鉄損解析時に応力を取扱う方法として「ミーゼス相当応力を用いる手法」、「主応力のスカラー値を用いる手法」、「主応力と磁束密度の向きを考慮する手法」の 3 つの手法を提案した。上記手法を用いて鉄損解析を行い、実測結果との比較を行った結果、「主応力と磁束密度の向きを考慮する手法」が他の手法よりも高精度となることを示した。

4. 回転子の製造ばらつきに起因するコギングトルクに関する理論検討により、鉄心の軸方向の一部にダミースロットを配置する新しい固定子鉄心構造を提案した。本構造の磁気回路モデルからコギングトルクを評価するパラメータを提案した。また、有限要素解析により提案構造の効果を明らかにし、評価パラメータの妥当性を検証した。さらに、モータの実測結果により、提案構造の有効性を実証するとともに、提案構造が平均トルクや出力、効率にほとんど影響を与えないことも示した。

上記のように本論文は、モータの回転子の渦電流損と製造工程に起因するモータ性能の変化に関する基礎的な課題設定、解析手法および低減手法について極めて独創的であって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 8 月 18 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降